2009 年 3 月

常伝導および超伝導状態にあるニオブへのスピン注入

物質系専攻　076112　大西 紘平
指導教員：大谷 義近（教授）

キーワード：スピン依存伝導、超伝導、スピンホール効果、スピン注入、準粒子

【背景・目的】

電子の持つ電荷とスピンの双方に着目し、スピンを制御することにより新しいエレクトロニクスの創製の目指す分野はスピントロニクスと呼ばれる。最新の微細加工技術や微小信号検出技術により、スピンを区別し、制御することは可能となり、実際に電子のスピンに依存した現象が検出されるようになった。スピントロニクス素子は従来の半導体エレクトロニクスと比較して、不揮発性、動作速度、消費電力など多くの点で優れており、近年、盛んに研究されている[1]。

スピントロニクスは、おもに金属や半導体中におけるスピン依存伝導として研究されてきたが、精密測定素子や量子ビットの制御などの超伝導エレクトロニクスの発展とともに、超伝導体を用いたスピントロニクスが注目されてきた。単金属などの超伝導体中ではスピンが反平行となった電子がクーパー対となる一方で、強磁性体中ではスピンは平行にそろうことにより磁化が発生する。したがって、本来、超伝導体と強磁性体は相反するが、メゾスコピック系で扱われる超伝導スピントロニクスでは、超伝導とスピン偏極の相互作用により様々な興味深い現象が現れることが知られている。近年、超伝導スピントロニクスには新しい機能性素子としての期待が高まっており、実際、いくつかの素子が理論的に提案されている[2]。

しかし、超伝導スピントロニクスの実験的研究では、おもに超伝導体として Al を用いられてきたため、転移温度が低く、ミリケルビンの温度領域での研究に限られてきた。量子コンピュータ素子や単電子トランジスタなどへの応用上、より高い温度での動作、より大きな超伝導ギャップを有した素子での研究が求められている。

上記のような背景から、本研究では、Al と比較して十分高い転移温度と大きい超伝導ギャップを有する Nb を超伝導体として、超伝導スピントロニクスの研究を行った。具体的には、Nb を微細加工し、おもにスピン注入の手法を用いることにより、常伝導および超伝導状態におけるスピン依存伝導を実験的に調べた。とくに、常伝導状態の Nb におけるスピンホール効果や、超伝導状態の Nb 内でのスピン拡散現象について明らかにすることを目的とした。

【実験方法】

本研究では、面内構造を用いてスピン注入を行った。スピン流とは電子のスピン角運動量の流れであり、図 1(a)のような面内構造を有した素子において、強磁性体である Py（Ni-Fe）から非磁性体である Cu に電流を流すことにより、Cu 中に発生する。このとき、スピン流は拡散流であるため、図 1 における注入端子より右側では、スピン流のみ存在する。

この Cu 中のスピン流の大きさは、検出用 Py 端子を Cu に接合することによって測定できる。これをスピンバルブ測定と呼ぶ。検出用 Py 端子と Cu 端子間の電圧は、2 本の Py 端子の相対角度に依存し、平行および反平行のとき最大となる。典型的なスピンバルブ測定の結果を図 1(b)に示す。磁場を図 1(a)に示した方向に印加することにより、2 本の Py 端子の保持力の違いから非局所抵抗変化を得ることができる。こ

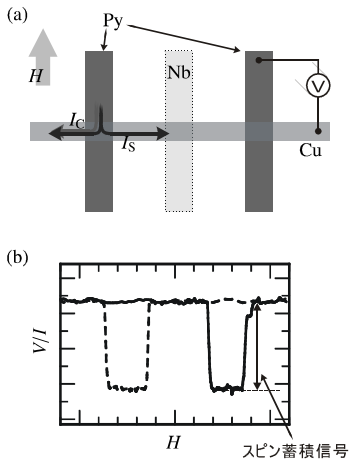

図 1：(a) スピンバルブ測定の模式図。(b) スピンバルブ測定による非局所抵抗変化。

の抵抗変化をスピン蓄積信号と呼ぶ。

スピン流はオーミック接合部において分流する。したがって、図 1(a)の点線で示したように、2 本の Py 間に Nb がオーミック接合されているとき、スピン流は Nb へ注入され、その大きさはスピン蓄積信号の変化から見積もることが可能である[3]。

本研究に用いた面内スピンバルブ素子は、2 通りのリフトオフ法を用いて作製した。第 1 の方法は、3 回リフトオフ法を繰り返す方法であり、本研究において新しく開発した Ti 保護膜を用いたスパッタ法により、高融点金属である Nb 細線を作製した。第 2 の方法は、斜め蒸着法であり、界面特性の優れた微細構造を作製した。両方法とも、Py、Cu 細線の作製は、それぞれ電子線加熱蒸着法と抵抗加熱蒸着法を用いた。

【結果および考察】

常伝導 Nb へのスピン注入

まず、常伝導状態にある Nb へスピン注入を行うことにより、スピンホール効果を測定した。スピンホール効果とは、電流とスピンに直交する方向にスピン流が発生し、また、スピン流とスピンに直交する方向に電流が発生する現象である。この効果は、強磁性体を用いないスピン流発生の機構として注目されているが、その詳細な発生機構は明らかになっていない。そのような中、Nb は内因性要因による大きなスピンホール伝導度を有するとの理論的報告[4]があった。そこで、本研究では、Nb のスピンホール効果の測定および定量的解析を行った。

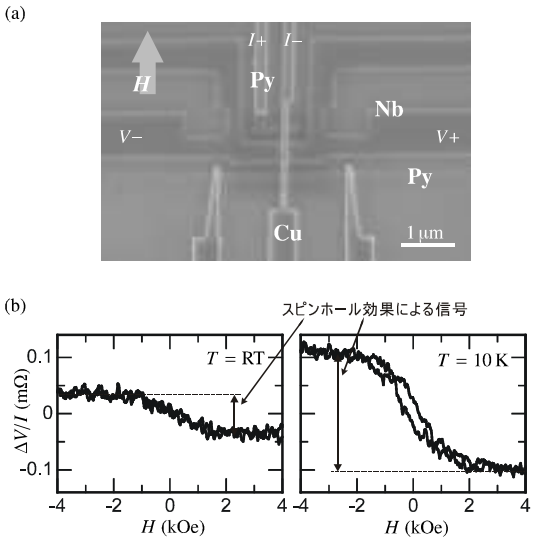

図 2：(a) スピンホール効果の測定を行った素子の電子顕微鏡写真と端子配置。(b) スピンホール効果の測定結果。

測定に用いた素子の電子顕微鏡写真を図 2(a)に示す。この素子は 3 回リフトオフ法を繰り返すことにより作製した。この素子において Nb に注入されるスピン流は、面直方向に流れると考えられるため、図中に示す方向に磁場を印加することにより、スピンホール効果による電圧が Nb 細線の両端に発生する。

実際、Nb のスピンホール伝導度が大きいことを反映し、図 2(b)に示すように、室温においてもスピンホール効果による抵抗変化が検出された。また、Nb 細線を接合させることによるスピン蓄積信号の大きさの変化から、Nb に注入されているスピン流を見積もり、スピンホール伝導度を定量的に求めた。その結果、スピンホール伝導度は -1.6×10^3 S/m となり、負の大きな値であった。これは、内因性要因によるスピンホール効果の計算結果と一致するものである。

超伝導 Nb へのスピン注入

次に、図 3 に示す素子を用いて、超伝導状態にある Nb へのスピン注入を行った。超伝導体中へはスピン流は準粒子として注入されると考えられるが、拡散過程の特性長であるスピン拡散長の超伝導体中における変化は未だ明らかになっていない。Nb/Cu 界面におけるスピン注入量は Nb のスピン拡散長に依存することがわかっているため、スピン蓄積信号の常伝導状態からの変化を測定することにより、超伝導状態にある Nb 中でのスピン拡散長の変化を見積もることが可能である。また、超伝導状態へのスピン注

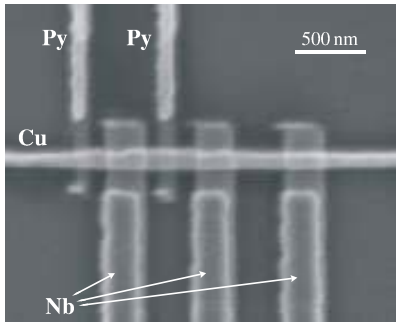

図 3：斜め蒸着法によって作製した素子の電子顕微鏡写真。

入は界面の状態に強く依存すると考えられるため、図 3 の素子は斜め蒸着法を用いて作製した。

図 4(a)に示す端子配置により、Nb の転移温度よりも十分低い温度でスピンバルブ測定を行った。図 4(c)に示すように、常伝導状態でのスピン蓄積信号と大きさに変化はみられなかった。さらに、スピン注入下の Nb/Cu 界面が超伝導状態にあることを確認するため、図 4(b)に示す端子配置により、直流電流によるスピン注入を行いながらジョセフソン接合の抵抗を測定した。その結果、図 4(d)に示すように、スピンバルブ測定におけるスピン注入量では、Nb/Cu 界面は超伝導状態が維持されていることが確認された。これらの結果は、超伝導状態においてもスピン拡散長が変化していないことを示している。

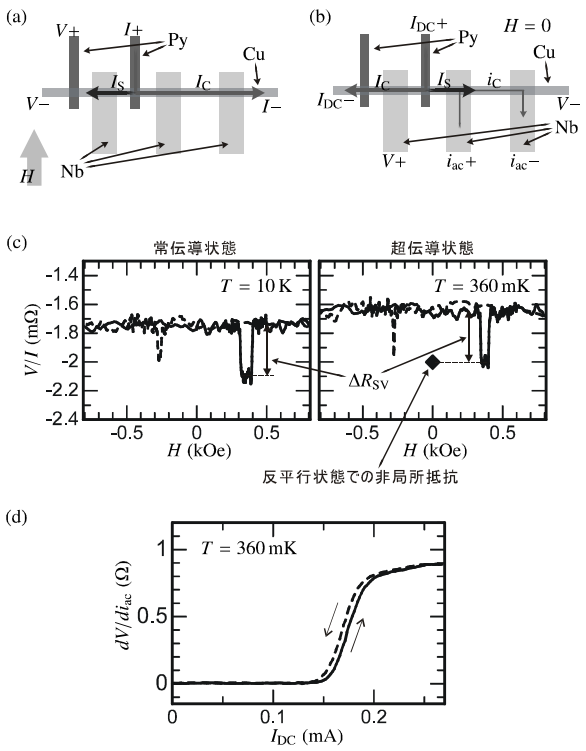

図 4： (a) スピンバルブ測定の端子配置。(b) 直流電流によるスピン注入下のジョセフソン接合の抵抗測定の端子配置。(c) スピンバルブ測定の結果。(d) スピン流注入によるジョセフソン接合の抵抗変化。

【まとめ】

本研究では、常伝導および超伝導状態にある Nb 中のスピン拡散過程を明らかにした。常伝導状態の Nb におけるスピンホール伝導度は、Nb におけるスピンホール効果の機構が内因性要因であることを支持するものであった。また、超伝導状態におけるスピン注入の結果は、超伝導体中におけるスピン流の拡散過程を明らかにするものであり、今後、より詳細なモデル化により超伝導スピントロニクス素子へつながることが期待される。

【参考文献】

[1] S. A. Wolf *et al.*, Science **294**, 1488 (2001); I. Žutić *et al.*, Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004)
[2] T. Yamashita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 097001 (2005); F. Giazotto *et al.*, Phys. Rev. B **77**, 132501 (2008)
[3] T. Kimura *et al.*, Phys. Rev. B **72**, 014461 (2005)
[4] T. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. B **77**, 165117 (2008)

【論文・紀要等】

1. K. Ohnishi, T. Kimura, and Y. Otani, Appl. Phys. Exp. **1**, 021701 (2008)
2. K. Ohnishi, T. Kimura, and Y. Otani, *Proceedings of the 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology - ISQM-TOKYO'08*

他 共著 1 件

【学会・研究会発表等】

1. 大西 紘平、木村 崇、大谷 義近（口頭発表）
「超伝導細線におけるスピン注入誘起準粒子の緩和過程」
日本物理学会 2008 年秋季大会（岩手大学、2008 年 9 月）
2. K. Ohnishi, T. Kimura, and Y. Otani（ポスター発表）
"Pure Spin Current Injection through Superconductive/Normal Metal Ohmic Interface"
APS March Meeting 2009 (Pittsburgh, March 2009)　　他 口頭 1 件、ポスター6 件